



普通高等教育“十二五”规划教材
大学物理创新教学丛书

大学物理实验 及创新设计

杨昌权 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
大学物理创新教学丛书

大学物理实验及创新设计

杨昌权 编著

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书系按《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2012年版)所编写,根据教学内容的基本要求和能力培养的基本要求,设置大学物理实验的课程体系、教学内容以及教学模式,目的是对学生进行物理实验基本知识的教育、基本技能的训练以及培养学生的创新意识、创新能力和设计实验、设计产品的能力。本书分为8部分:绪论介绍物理实验课的重要性和学习目的;第1章介绍测量、误差、不确定度、有效数字及实验数据的处理方法;第2章介绍物理实验的基本测量方法;第3章介绍7个基本物理量的测量;第4章介绍基础性物理实验;第5章介绍综合性物理实验;第6章介绍初步设计性物理实验;第7章介绍物理实验的创新设计,为物理实验能力较强的同学提供一个良好的实践平台。

本书可供理(非物理学)工科类专业的大学生使用,亦可为从事物理教学的大学、中学老师提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验及创新设计/杨昌权 编著. —北京:科学出版社,2015.1

(大学物理创新教学丛书)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-041058-0

I. ①大… II. ①杨… III. ①物理学—实验—高等学校—教材
IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127780 号

责任编辑:吉正霞 黄彩霞/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2015年1月第 一 版 印张:13 1/2

2015年1月第一次印刷 字数:317 000

定价:29.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学是自然科学的基础,是一门实验科学.物理实验课是理、工、医、农等各学科最基本的课程之一,是物理学理论知识与实际生活紧密联系的纽带,是培养学生实践能力和创新设计能力重要的有效途径之一,对学生科学素质的培养具有重要意义.随着时代的发展,物理学近年来在其他学科中迅速渗透和广泛应用,大学物理实验的内容必须“与时俱进”,我校积极改革大学物理实验教学体系和内容,淘汰一些陈旧的实验项目,大力引进新技术,设计新的实验项目,使我校的大学物理实验紧跟时代发展,取得了可喜的效果.

本书是按照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2012年版)编写而成的.根据教学内容和能力培养的基本要求,设置大学物理实验课的课程体系、教学内容以及教学模式,实行分层次教学,即基础性实验、综合性实验、设计性实验和创新设计四个层次的教学.

大学生思想活跃,且具有一定的基础理论知识和专业知识,是最具创新潜力的群体之一.本书顺应时代对高校的要求,改变过去自然科学与社会科学相脱离的状况,增加创新理论和实践内容,培养大学生的创新意识,使他们掌握创新规律和方法,从而达到培养学生创新能力的目的.这也是本书的一个亮点.

本书是本人20多年来大学物理实验教学经验和教学研究成果的总结,同时,它的顺利完成得到了我院老师们的支持,特别是孟桂菊教授和汪瑞祥副教授的大力支持,也感谢我院物理实验创新基地的指导老师和同学们的辛勤劳动,对老师们、同学们和科学出版社工作人员的付出和大力帮助表示由衷的感谢!

由于水平有限,书中的错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正.

杨昌权

2014年5月于黄州

目 录

前言

绪论	1
第一节 物理实验的重要性	1
第二节 大学物理实验课的任务与要求	2
第三节 物理实验课的基本程序	4
第一章 测量的不确定度及数据处理	6
第一节 测量与仪器	6
第二节 测量与误差	7
第三节 系统误差与随机误差	7
第四节 实验中的错误与高度异常值	10
第五节 测量不确定度	11
第六节 有效数字	15
第七节 组合测量与最佳直线参数	16
第二章 物理实验的基本测量方法	23
第一节 比较法	23
第二节 积累与放大法	24
第三节 转换测量法	25
第四节 模拟法	27
第三章 基本物理量的测量	28
第一节 长度	28
第二节 时间	35
第三节 质量	37
第四节 温度	40
第五节 电流	44
第六节 摩尔	45
第七节 发光强度	46
第四章 基础性物理实验	47
实验一 密度的测量	47
实验二 牛顿第二定律的验证	49
实验三 用混合法测量固体的比热容	52
实验四 金属线胀系数的测定	55
实验五 弦振动的研究	58

实验六 制流电路与分压电路	61
实验七 伏安法测电阻	66
实验八 惠斯通电桥测电阻	69
实验九 万用表的设计制作与定标	73
实验十 示波器原理及使用	76
实验十一 薄透镜焦距的测定	82
实验十二 固体液体折射率的测定	86
第五章 综合性物理实验	90
实验一 动量守恒定律的验证	90
实验二 三线摆法测转动惯量	92
实验三 伸长法测量杨氏模量	98
实验四 伏安法测二极管或白炽灯的特性	103
实验五 静电场的描绘	105
实验六 磁场的测量	111
实验七 平行光管的调整及使用	116
实验八 密立根油滴实验	122
实验九 弗兰克-赫兹实验	128
第六章 设计性物理实验	133
实验一 弹簧振子的研究	135
实验二 衍射法测量微小长度	137
实验三 电表的扩程与校准	141
实验四 用箱式电位差计测量电动势	145
实验五 迈克耳孙干涉仪的调整及使用	150
实验六 等厚干涉现象的研究	156
第七章 创新理论及物理实验创新设计	164
第一节 创新理论	164
实验一 霍尔传感器测量微小长度	176
实验二 电磁辐射检测频谱仪的设计与制作	184
实验三 智能节能电风扇的设计与制作	188
实验四 便携式太阳能半体制冷箱	190
实验五 基于霍尔传感器的车速测量与报警系统	196
附录 物理常量表	201

绪 论

第一节 物理实验的重要性

一、物理实验在物理学中的地位与作用

物理学是自然科学的基础,它的研究方法有理论研究方法和实验研究方法两种.理论研究最终要经实验检验,所以说物理学是一门实验科学,物理实验的重要性可见一斑.从物理学的发展过程来看,实验是决定性的因素.发现新的物理现象,寻找物理规律,验证物理定律等,都只能依靠实验.离开了实验,物理理论就会苍白无力,就会成为“无源之水,无本之木”,不可能得到发展.

力学是物理学中最早形成的分支理论,16 世纪伟大的实验物理学家伽利略,用他出色的实验工作把古代对物理现象的一些观察和研究引上了当代物理学的科学之路,使物理学发生了革命性的开端,如自由落体定律、惯性定律等,都是由伽利略通过实验发现和总结出来的.万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实验所证明,力学中的核心规律牛顿三大定律也是实验的总结.

电磁学的定量研究和发展是从库仑定律开始的,此定律是从库仑发明的扭秤并用它来测量电荷之间的作用力开始的;热学是从玻-马定律等三个实验规律开始的;光学的研究是从大量的观察和测量得到的反射定律和折射定律开始的.经典物理学的基本定律几乎全部是实验结果的总结和推广.在 19 世纪以前,没有纯粹的理论物理学家,对物理理论的发展有重大贡献的牛顿、菲涅耳、麦克斯韦等,都亲自从事实验工作.

19 世纪末的物理学界晴朗天空的“两朵乌云”(即黑体辐射实验和迈克耳孙-莫雷实验)和“三大发现”(即 X 射线、放射性和电子),拉开了近代物理的序幕.由于物理学的发展越来越复杂,才有了以理论研究为主和以实验研究为主的分工,出现了“理论物理学家”.爱因斯坦无疑是最著名的理论物理学家,他获得诺贝尔物理学奖是因为他正确解释了光电效应.

物理实验不仅对于物理学的研究极其重要,对于其他学科也非常重要.材料科学、计算机技术、电子物理、电子工程、光源工程、光电信息工程等学科都有大量物理学的应用;在化学中,从光谱分析到量子化学,从放射性测量到激光分离同位素,也无不是物理学的应用;在生物学的发展中,离不开各类显微镜的贡献,DNA 的双螺旋结构就是美国的遗传学家和英国的物理学家共同建立并为 X 射线衍射实验所证实的,而对 DNA 的操纵、切割、重组也都离不开物理学家的帮助;在医学中,从 X 射线透视、CT 诊断、B 超诊断、核磁共振

诊断到各种理疗手段,都是物理学的应用.物理学正在渗透到各个学科领域,而这种渗透无不与实验密切相关.

二、物理实验的教育功能

物理实验对学生的发展起着非常重要的作用,它是培养学生科学素质的重要途径之一,它除了一般理论课所具备的教育功能之外,还具有如下三个独特的教育功能:

(1) 促进学生手脑的协调发展. 青少年时期,是手脑发展的关键时期,二者的协调发展尤为重要.手和脑发展的结合点是实践活动,物理实验是一种能动的实践活动,合理的操作需要思维的指导,而在思维指导下的熟练操作往往是产生新思想的源泉.

(2) 促进学生认知结构的变化.物理实验的教学适应大学生的认知发展水平,并且学生通过动手、动脑的实验学习能有效地纠正头脑中非科学的概念.物理实验教学对并列结合学习效果明显,对学生学习达到较高认知目标上有积极的促进作用.

(3) 可以发展非智力因素.与理论课现有的结论不同,物理实验课总是先质疑,勇于质疑可以培养学生的探索精神.物理实验的对象是复杂多变的自然现象,学生必须具有自觉性、果断性,这样才能对复杂的情况采取适当的措施.测量数据需要反复多次,还可能经历多次失败才能获得,所以物理实验可以培养坚毅不拔等意志和品质.观察和测量是从大自然获得的真实信息,任何想当然或者编造的事实,绝不可能得出科学的结论,所以物理实验能够培养学生实事求是的科学态度.

然而,重理论轻实践的错误观念至今仍有影响,我国的学校教育,特别是中学,并不重视物理实验的教育.美籍华裔物理学家杨振宁先生于1982年指出:“像我这样有了一点名气的也有不好的影响,在国内有许多的青年人都希望搞我这一行(指搞理论),但是,像我这样的人,中国目前不是急需.要增加中国的社会生产力需要的是很多会动手的人.”另一位美籍华裔物理学家丁肇中先生,也强调物理实验的重要性,他在1978年领取诺贝尔物理学奖时说:“我的获奖,将唤起发展中国家的学生们对实验的兴趣.”据统计,自1901年诺贝尔物理学奖颁奖以来,实验物理学家得此奖的人数是理论物理学家的两倍,而近30年以来,此比例更高,为6倍.由此可见物理实验的重要性.因此,我们要摆正理论与实践的关系.

第二节 大学物理实验课的任务与要求

两届教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会非物理学专业物理基础课教学指导分委员会,在教育部高等教育司的直接指导下,深入调查研究,广泛听取各方面的意见,特别是第一线老师的意见及有丰富教学经验的资深专家的意见,反复修订10多次,提出非物理学专业大学物理实验课的任务.

一、非物理学理工科大学物理实验课的任务

(1) 培养学生的基本科学实验技能,提高学生的基本科学实验素质,使学生初步掌握实验科学的思想和方法.培养学生的科学思维和创新意识,使学生掌握实验研究的基本方法,提高学生的分析能力和创新能力.

(2) 提高学生的科学素质,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德.

二、通过物理实验课应达到的三个基本要求

(1) 系统掌握基本知识、基本方法、基本技能.

通过物理实验使学生在基本知识、基本方法、基本技能(三基)方面得到严格而系统的训练,是做好物理实验的基础.

基本知识包括实验原理、各类仪器的结构与工作机理、实验的误差分析与不确定度评定、实验结果的表述方法、如何对实验结果进行分析与判断等.

基本方法包括如何根据实验目的和要求确定实验的思路与方案、如何选取和正确使用仪器、如何减少各类误差、如何采取一些特殊的方法来获取通常难以获得的结果等.

基本技能包括各种调节与测试技术(如粗调、微调、准直、调零、读数、定标……),真空技术、电工技术、传感器技术、金工技术以及查阅文献的能力、自学能力、协作共事的能力、总结归纳能力、口头表达能力等.

(2) 学习用实验方法研究物理现象、验证物理规律,加深对物理理论的理解和掌握,并在实践中提高发现问题、分析问题和解决问题的能力.

研究物理现象和验证物理规律是进行物理实验的根本目的,在学习“三基”的过程中要有意识地学习这种能力.一般的验证性实验虽然是教师安排好的,但学生应仔细体会其中的奥妙所在,不应只按所规定的步骤操作、记数据、得出结果就算完成.要多问为什么,想一想如果不按所规定的步骤会出现什么问题?能否用其他的方法达到同样的实验目的?有条件的情况下,也可以自己设计实验.

只从书本上得到的知识往往是不完整的、不具体的,只有通过实验,亲自动手、亲身体会,才能学到有血有肉的活生生的物理,才能使抽象的概念和深奥的理论变成具体的知识和实际经验,变成在解决实际问题中的有力工具.根据学习理论,动手操作所掌握的知识比视听所获得的知识的效果要好得多.

(3) 养成实事求是的科学态度和积极创新的科学精神.

因为物理学研究“物”之“理”,就是从“实事”中去“求是”,所以严肃认真的物理学工作者都必须坚持用实践来检验理论研究成果.物理学的实践就是物理实验,在物理实验课中最能培养实事求是、严谨踏实的科学态度,不要因为一些实验的结果可以预知,而篡改甚至伪造数据,应严格规定不能用铅笔记录实验数据,不能使用涂改液,数据的更改要说明理由,数据的取舍要根据一定的规则.实验结果没有“好坏”之分,与预想的不一致的

实验结果,还应特别重视,它可能是某个新发现的开端. 积极创新的科学精神与实事求是的严谨态度是密切相关的,只要认真地去实验,一定会发现许多的问题,解决这些问题往往需要坚韧不拔的毅力和积极创新的思维. 所以,实验室应当而且可以成为培养学生实事求是的科学态度和积极创新的科学精神的最好场所.

第三节 物理实验课的基本程序

一、预习

预习对于实验课比理论课更为重要,不预习也许可以听好一堂理论课,但决不可能完成好一堂实验课. 实验课预习分为理论预习和仪器预习.

理论预习的基本要求是仔细阅读教材和网上提供的资料,了解实验的目的和要求、实验原理、方法和仪器设备.

仪器预习是根据实验室的安排到实验室对照仪器预习,了解仪器的构造、性能、操作规程及注意事项,并进行动手操作. 预习完毕,要画好记录表格,写明实验步骤和注意事项.

二、实验操作与记录

实验室中有大量的仪器设备和实验材料,有大功率电源、水源、激光、放射源、易燃易爆物品,以及其他有毒、有害物品等. 因此,学生进入实验室之前要严格学习相关的规章制度,如学生实验室守则、实验室安全制度、仪器使用及赔偿制度等,以确保人身安全和仪器设备安全.

做实验时,要仔细阅读仪器使用说明书,明确注意事项,严格按照实验步骤和操作规程进行实验. 既要胆大又要心细,要严肃认真、一丝不苟,对于精密贵重的仪器和元件,特别要稳拿妥放,防止损坏. 在电磁学实验中,必须经老师检查同意后才可接通电源. 在调节时,应先粗调后微调. 在读数时,应先取大量程后取小量程. 实验完毕,应整理好仪器,关好水、电、煤气等,经老师同意后才能够离开实验室.

实验记录是实验的重要组成部分,它应全面真实地反映实验的全过程,包括实验的主要步骤,观察与测量的条件,观察到的现象和数据. 数据常用表格来记录,要做到随测随记,记录原始数据,不能随意舍去某个数据,决不可伪造和篡改数据,记录要尽量清晰、详尽. 科学研究中的实验记录本是极其宝贵的资料,要长期保存.

三、写实验报告

以实验记录为基础撰写实验报告,其内容包括课题、目的、仪器及用具、原理、步骤、数

据记录及处理、对实验进行分析和讨论。

实验原理部分的内容较多,可简明扼要;实验数据的处理是实验的重点,要得出结果或结论,它不是简单的测量结果,还应包括不确定度的评定、对测量结果与期望值的关系讨论。

对实验的分析和讨论尤为重要,可以使学生的思维能力和创新能力得到锻炼和发展。除了以上对实验结果的讨论之外,还可以对实验感兴趣的、关键的问题进行讨论。例如,是否有其他的实验方法,实验遇到的困难的处理,对实验设计改进的设想和问题,对实验中出现的异常现象的分析与判断、处理等。

实验报告不是写给老师的,而应是学习生活的足迹,写实验报告是培养实验研究人才重要的一环。

参考文献

- [1] 中国计量科学研究院. 计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.

参考文献

- [1] 中国计量科学研究院. 计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.

参考文献

- [1] 中国计量科学研究院. 计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 法定计量单位. 北京: 中国计量出版社, 1984.

第一章 测量的不确定度及数据处理

第一节 测量与仪器

一、测量

(1) 测量的定义. 物理实验离不开测量, 测量是指为确定被测量对象的量值而进行的被测物与仪器相比较的实验过程. 它分为直接测量和间接测量.

(2) 直接测量. 直接测量是指被测物和仪器直接比较, 得出被测量量值的测量.

(3) 间接测量. 间接测量是指由一个或几个直接测得量经已知函数关系计算出被测量量值的测量. 例如, 测量固体的密度 ρ , 通过测量固体的质量 m 和体积 v , 利用公式计算出固体的密度 $\rho = \frac{m}{v}$ 的过程的测量.

二、仪器

(1) 测量仪器. 测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具, 如螺旋测微器、物理天平、温度计、电流表、照度计等.

(2) 基准. 一个国家的最准确的计量器具称为主基准. 全国各地的由主基准校准过的计量器具叫做工作基准.

(3) 仪器的准确度等级. 测量时是以计量器具为标准进行比较, 当然要求仪器准确. 国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级. 各类各等级的仪器, 又有对准确度的具体规定. 例如, 1 级螺旋测微器, 测量范围小于 50 mm, 最大误差不超过 ± 0.004 mm; 又如, 1.0 级电流表, 测量范围为 0 ~ 500 mA 的基本误差限为 ± 5 mA.

习 题 一

1. 测量就是比较, 试说明如下的测量是如何体现比较的:

- (1) 用杆秤称量一个冬瓜的重量;
- (2) 用弹簧秤称一新生婴儿的重量.

2. 你知道如何去做下面的测量吗?

- (1) 跑一百米的时间;

(2) 子弹的速度.

3. 电梯运动时有加速度, 将一弹簧秤放在电梯上, 其上放 1 kg 重砝码, 电梯运动时秤的指示值是 1 kg 吗? 秤的指示值和电梯加速度是否有联系?

4. 间接测量量是否可能成为直接测量量呢?

第二节 测量与误差

做物理实验时要对一些物理量进行测量. 每一个物理量的测量, 都是在实验当时的条件下进行的, 都有一个不以人们意志为转移的真实大小.

一、真值

物理量的客观大小叫被测量的真值, 通常用字母 a 来表示. 测量的理想结果是真值, 由于测量仪器只能准确到一定程度; 还有测量环境条件的影响; 观测者的操作和读数不能十分准确; 理论的近似性等原因, 所以它是不能确知的.

二、误差

由于测量值和真值总可能不一致. 误差的定义是: 测量值与真值的差, 通常用字母 ϵ 来表示. 即误差 $(\epsilon) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(a)$. 当 $x \geq a$ 时, $\epsilon \geq 0$; 当 $x < a$ 时, $\epsilon < 0$.

不能因为测量有误差就觉得测量没有意义, 测量的任务如下:

- (1) 设法将测得值中的误差减至最小;
- (2) 求出在测量的条件下, 被测量的最近真值(最佳值);
- (3) 估计最近真值的可靠程度.

三、绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差 (Δx) . 绝对误差 $(\Delta x) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(a)$.

(2) 相对误差. $\frac{\Delta x}{x} \times 100\%$ 即为相对误差.

相对误差更能说明测量结果的好与坏.

由于真值是不能确知的, 所以实际测量中用算术平均值代替真值, 用偏差(残差 v_i)来表示误差, 偏差 $(v_i) = \text{测量值}(x) - \text{算术平均值}(\bar{x})$, 其相对误差 $E = \frac{v_i}{x} \times 100\%$.

第三节 系统误差与随机误差

根据误差性质和来源来分, 误差分为系统误差和随机误差.

一、系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观测人不变等)多次测量同一物理量时,符号和绝对值保持不变的误差,或按某一确定的规律变化的误差,称为系统误差,如仪器自身的误差,2.5级0~100 mA的电流表,在测量范围内测量值的误差要小于 $2.5\% \times 100 \text{ mA}$,即2.5 mA;0.5级0~100 mA的电流表,在测量范围内测量值的误差要小于 $0.5\% \times 100 \text{ mA}$,即0.5 mA.因此,0.5级的电流表测量值比2.5级的电流表测量值更可靠.但是任何精密仪器都是有误差的.

二、系统误差的来源

(1) 理论(方法)误差.如单摆的周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$,是在摆角很小(接近 0°),忽略空气对摆球的阻力等条件下才成立的,实验中此公式只是近似成立.

(2) 仪器误差.任何精密的仪器都是有误差的.这与仪器的精度有关系,精度越高误差就越小.

(3) 环境误差.实验要满足一定的条件,而在做实验过程中,无法满足这些条件,必然对实验结果产生影响.

(4) 个人误差.实验者的某些不良习惯造成的误差,如读数斜视等.

还有其他的原因,总之系统误差都有明确原因,因此对它的研究主要是,探索系统误差的来源,设计实验方案消除或消减该项误差;估计残存系统误差的可能范围.

三、随机误差

在同一条件下多次测量同一物理量时,测得值总是有稍许差异而且变化不定,并在消除系统误差之后依然如此,这部分绝对值和符号经常变化的误差,称为随机误差,又称偶然误差.

四、随机误差产生原因及规律

微小干扰引起的,无法控制,伴随测量而产生.随机误差遵从统计分布规律:

- (1) 有界性.误差不可能超过一定范围.
- (2) 单峰性.小误差出现的几率大于大误差.
- (3) 对称性.正负误差出现的机会相近.

用手控秒表测量某单摆的周期共200次,测量值的大小变化不定,似乎没有规律,其实这种偶然现象服从统计规律.现将测得值分布的区域等分为9个区间,统计各区间内测量值的个数 N_i ,以测量值为横坐标, $\frac{N_i}{N}$ 为纵坐标(N 为总数)作统计直方图,某一次的测

量结果,如图 1.1 所示.

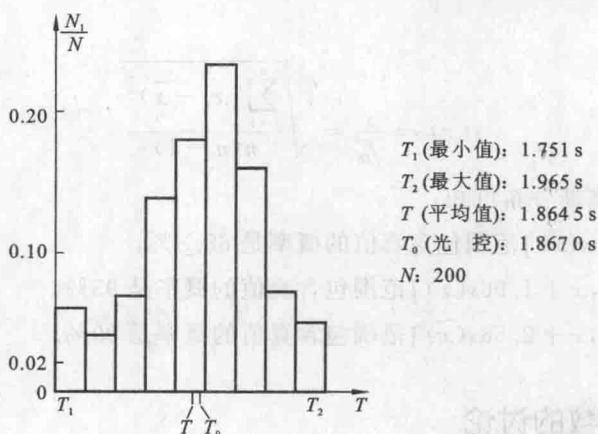


图 1.1 统计直方图

多次测量与上面有相似的结果,因此可以得到偶然误差遵从统计规律.

五、算术平均值

设在相同条件下的 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$, 真值为 a , 则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

$$\text{算术平均值 } \bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n).$$

假如各测量值的误差只是随机误差,而随机误差有正有负,相加时可以抵消一些,所以 n 越大,算术平均值越接近真值. 因此可以用算术平均值作为被测量真值的最佳估值.

一般来讲测量值中包含系统误差,而相加时它们不能抵消,这时应当用算术平均值减去系统误差作为被测量真值的最佳估值.

六、实验标准偏差

具有随机误差的测量值将是分散的,对同一被测量做 n 次测量,表征测量结果分散性的量 s 称为实验标准偏差, s 可由贝塞尔公式算出:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

七、平均值的实验标准偏差

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

按误差理论的高斯分布可知:

$[\bar{x} - s(\bar{x}), \bar{x} + s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率是 68.3%,

$[\bar{x} - 1.96s(\bar{x}), \bar{x} + 1.96s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率是 95%,

$[\bar{x} - 2.58s(\bar{x}), \bar{x} + 2.58s(\bar{x})]$ 范围包含真值的概率是 99%.

八、关于测量次数的讨论

增加测量次数 n , 计算平均值时的抵偿效果会好些, 但是测量次数也不是越多越好, 因为要增加 n , 测量的时间就要延长, 实验环境可能出现不稳定, 实验者也会疲劳, 这将引入新的误差. 因此测量次数 6 ~ 10 为宜, 并不是越多越好.

过失误差(粗大误差): 粗心大意, 疲劳过度造成, 此类误差数据应记录, 经分析后才能够去掉.

习 题 二

1. 工厂生产的仪器经检验为合格品, 用它测量会有误差吗?
2. 一组测量值, 相互差异很小, 此测量值的误差很小吗?
3. 算术平均值作为真值的最佳估计值是否有条件?
4. 测量不可能没有误差, 作为实验者应当使组织的实验尽量减少误差, 你能就用单摆测重力加速度的实验, 设想如何减小误差吗?

第四节 实验中的错误与高度异常值

实验中出现错误是难免的, 可能是公式错了、装置安错了、电路联错了、读数错了等. 实验弄错了在时间上和精神上都是损失, 我们首先要防止出现错误, 其次要尽早地发现错误. 这需要实验者具有一定的实验素养.

在一组数据中, 有的数据稍许偏大或偏小, 要加以分析, 不能随意删去这些数据, 如果简单的数据分析不能判定它是错误数据, 就要借助误差理论. 这里介绍格鲁布斯判据.

设在相同的条件下的 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 近似为正态样本, 其平均值为 $\bar{x}$, 实验

标准偏差为 s , 取统计量 G 为残差 $(x_i - \bar{x})$ 与 s 之比:

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

格鲁布斯判据给出 G 的分布的临界值 $G(n, \alpha)$ (α 为显著性水平). 对可疑值 x_m , 当 $\frac{|x_m - \bar{x}|}{s} > G(n, \alpha)$ 时, 就判定 x_m 为高度异常值. 表 1.1 为格鲁布斯判据临界值表.

表 1.1 格鲁布斯判据临界值表

($\alpha = 0.01$)

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$G(n, \alpha)$	1.15	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55	2.61
n	14	15	16	17	18	19	20	25	30	40	50
$G(n, \alpha)$	2.66	2.70	2.74	2.78	2.82	2.85	2.88	3.01	3.10	3.24	3.34

$G(n, \alpha)$ 可用下式近似计算得出:

当 $n < 30$,

$$G(n, \alpha) = \frac{\ln(n - 2.65)}{2.31} + 1.305$$

当 $n \geq 30$,

$$G(n, \alpha) = \frac{\ln(n - 3)}{2.30} + 1.36 - \frac{n}{550}$$

例如, 测得一组长度值(单位: cm): 98.28, 98.26, 98.24, 98.29, 98.21, 98.30, 98.97, 98.25, 98.23, 98.25, 计算出

$$\bar{x} = 98.328 \text{ cm} \quad s = 0.227 \text{ cm}$$

$$n = 10 \quad G(n, \alpha) = 2.41$$

$$\bar{x} - G(n, \alpha)s = 97.781 \text{ cm} \quad \bar{x} + G(n, \alpha)s = 98.875 \text{ cm}$$

数据 98.97 在此范围之外应舍去. 除去后再计算

$$\bar{x} = 98.257 \text{ cm} \quad s = 0.029 \text{ cm} \quad s(\bar{x}) = 0.010 \text{ cm}$$

第五节 测量不确定度

测得值只能是真值的近似值, 现在要讨论的不是测得值和真值的偏离大小, 而是如何计算测得值与真值之差的可能范围, 即测量的不确定度.

测量不确定度的来源很多, 这些不同来源的不确定度在计算方法上只有两类, 一类称为 A 类分量, 它是用统计学方法计算的分量, 是随机误差性质的不确定度; 另一类称为 B 类分量, 它是用其他方法(非统计方法)评定的分量, 是系统误差性质的不确定度.